

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Das Werk bzw. der Inhalt darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtsinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

Copyright and Moral Rights for this thesis are retained by the author and/or other copyright owners. The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

Der Klimawandel kommt in Fluss

*Die Jahrhundertflut in Deutschland im Sommer 2002 hat die Klimaproblematik in den Blickpunkt der Öffentlichkeit „gespült“. DR. MOJIB LATIF, bis vor kurzem Wissenschaftler am **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE** in Hamburg, mahnt, nicht mit unserem Planeten zu experimentieren. Vielmehr sollte die Menschheit endlich die Weichen für eine nachhaltige Klimapolitik stellen.*

Der Mensch greift über seine vielfältigen Aktivitäten in den Spurengas-Haushalt der Atmosphäre ein und beeinflusst damit die globale Strahlungsbilanz. Das hat langfristig Folgen für das Klima, da sich die unteren Luftschichten und die Erdoberfläche erwärmen – was zum „anthropogenen“, vom Menschen angestoßenen Treibhaus-Effekt führt. Von größter Bedeutung ist dabei das Kohlendioxid (CO_2). Dieses Spurengas wird vor allem durch die Nutzung fossiler Brennstoffe wie Erdöl, Kohle oder Erdgas freigesetzt, und deshalb ist sein Ausstoß eng an den weltweiten Energieverbrauch gekoppelt. Weitere wichtige Spurengase sind Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O) sowie die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW). Auf das Kohlendioxid entfällt etwa die Hälfte des anthropogenen Treibhauseffekts – und die Tatsache, dass seine typische Lebenszeit in der Atmosphäre etwa ein Jahrhundert beträgt, erklärt die Langfristigkeit des Klimaproblems. Wie Messungen belegen, ist der CO_2 -Pegel der Atmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution rasant gestiegen. Lag er um 1800 noch bei etwa 280 ppm – also bei 280 CO_2 -Molekülen unter einer Million Luftteilchen –, so misst man heute bereits 370 ppm.

Dass der Mensch für diesen Anstieg verantwortlich zeichnet, ist unstrittig. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass der CO_2 -Gehalt heute so hoch ist wie seit etwa 400 000 Jahren nicht mehr. Dabei unterlag er durchaus natürlichen Schwankungen. Doch Eisbohrkerne, also im Eis eingeschlossene Luftbläschen, zeigen, dass die CO_2 -Konzentration stets zwischen 200 und 300 ppm blieb. Während der letzten Eiszeit vor etwa 20 000 Jahren lag sie bei etwa 200 ppm, während der letzten Warmzeit vor 120 000 Jahren hingegen bei 300 ppm. Wir befinden uns also derzeit deutlich oberhalb der natürlichen Schwankungsbreite.

Die Erde – eine Tiefkühltruhe

Hätte die Erde keine Atmosphäre, würde ihre Oberflächentemperatur allein von der Bilanz zwischen einstrahlter Sonnenenergie und der vom Boden abgestrahlten infraroten Wärmestrahlung bestimmt und im globalen Mittel etwa minus 18 Grad Celsius betragen. Selbst eine Lufthülle aus reinem Sauerstoff und Stickstoff – den beiden Hauptbestandteilen der Atmosphäre – würde daran nicht viel ändern. Doch bestimmte Spurengase,

und so auch Kohlendioxid, absorbieren die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung und emittieren langwellige Strahlung zurück in Richtung Erdboden. Das führt zu einer zusätzlichen Erwärmung; deshalb beträgt die Temperatur der Erdoberfläche im globalen Mittel rund plus 15 Grad Celsius: Diesem natürlichen „Treibhauseffekt“ ist es zu verdanken, dass es auf unserem Planeten überhaupt Leben gibt.

Die Konzentration der langlebigen Treibhausgase steigt systematisch an: seit Beginn der Industrialisierung bis heute bei Kohlendioxid um etwa 30 Prozent, bei Methan um 120 Prozent und bei Distickstoffoxid um rund 10 Prozent. Das treibt langfristig die Temperatur der unteren Atmosphäre und der Erdoberfläche hoch. Diese Erwärmung nimmt mit der Konzentration zu, wird aber auch stark von der Reaktion des Wasserkreislaufs bestimmt – der sowohl verstärkend als auch dämpfend wirkt, da viele seiner Zweige von der Temperatur abhängen. Ein verstärkter Treibhauseffekt führt daher zu Veränderungen des Niederschlags, der Bewölkung, der Meereis-Ausdehnung, der Schneebedeckung, des Meeresspiegels sowie der Wetterextreme – und verändert das

Reaktion mit Verzögerungseffekt

globale Klima. Dabei bekommt die Menschheit, und das hat die Elbeflut deutlich gemacht, vor allem die Änderung der Extremwerte zu spüren.

Der starke Zuwachs der Treibhausgase – besonders des Kohlendioxids – in der Atmosphäre verstärkt den Treibhauseffekt und bedeutet eine globale Erwärmung an der Erdoberfläche. So drängt sich die Frage auf, was man schon heute an Klimaänderungen beobachten kann. Dabei gilt, dass das Klima auf äußere Anstöße mit einer Verzögerung von einigen Jahrzehnten anspricht. Man darf also nicht davon ausgehen, heute schon die ganze zu erwartende Erwärmung zu beobachten. Doch Rekonstruktionen der Temperatur auf der Nordhalbkugel der vergangenen 1000 Jahre enthüllen einen deutlichen Erwärmungstrend in den vergangenen 100 Jahren. Allerdings wurden die Temperaturen bis 1900 vor allem aus indirekten Verfahren wie etwa aus der Analyse von Wachstumsringen an Bäumen abgeleitet, was erhebliche Ungenauigkeiten mit sich bringt. Doch selbst dann, wenn man von der maximalen Unsicherheit ausgeht, bleibt das Jahrzehnt von 1990 bis 1999 das bisher wärmste in den letzten 1000 Jahren.

Weitere statistische sowie auf Modellen basierende Indizien zeigen, dass der beobachtete Temperaturanstieg

der vergangenen Jahrzehnte mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf den Menschen zurückgeht. Zwar traten in der Vergangenheit immer wieder Klimaschwankungen auf, die nicht dem Menschen zuzuschreiben waren – so die mittelalterliche Warmzeit und die kleine Eiszeit. Doch diese Abweichungen waren, verglichen mit dem Anstieg der Temperatur in den letzten Jahrzehnten, zumindest im globalen Maßstab deutlich schwächer.

Immer wieder wird nach der Rolle der Sonne bei der Erderwärmung gefragt. Tatsächlich schwankt die Sonneneinstrahlung – unter anderem mit der Sonnenflecken-Aktivität. So steigt mit der Zahl der Flecken die Einstrahlung, und gleichzeitig verschiebt sich das Sonnenspektrum in den kurzwelligen, ultravioletten Bereich. Dabei beobachtet man zwei Zyklen: Zum einen den so genannten Schwalbe-Zyklus mit einer Periode von elf Jahren und einer gemessenen Amplitude von etwa 0,1 Prozent; zum anderen den Gleissberg-Zyklus mit einer Periode von rund 80 Jahren und einer geschätzten Amplitude von 0,2 bis 0,3 Prozent der gesamten Einstrahlung. Die Sonnenstrahlung kann bis zu 0,6 Watt pro Quadratmeter schwanken. Zum Vergleich: Der zusätzliche Treibhauseffekt durch erhöhte Konzentration von Kohlendioxid, Methan, Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe und Distickstoffoxid macht derzeit um 2,4 Watt pro Quadratmeter aus.

Gemittelt über die letzten 100 Jahre stieg die Solar-konstante: Die Forscher schätzen sie heute um 0,25 Prozent höher als vor 100 Jahren. Modellsimulationen zeigen, dass nur 0,2 Grad Celsius – und damit ein Drittel – der seit 1900 beobachteten Erderwärmung auf die Sonne zurückgehen. Also kann die Sonnenvariabilität allein nicht den beobachteten Temperaturanstieg von etwa 0,7 Grad Celsius erklären: Der überwiegende Anteil der Erderwärmung ist vom Menschen verursacht. Dies ist Konsens in der internationalen Klimaforschung und im Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change dokumentiert.¹ Angesichts dieser Tatsache kann es heute nicht mehr darum gehen, ob der Mensch das Klima beeinflusst, sondern nur noch darum, inwieweit sich die Klimaveränderung eindämmen lässt.

¹ Das IPCC wurde 1988 von der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization, WMO) und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme, UNEP) gegründet. Die Ergebnisse der Arbeiten des IPCC sind die Basis für die internationalen Klimaverhandlungen im Rahmen der Vereinten Nationen. Der IPCC-Bericht des Jahres 2001 ist im Internet unter www.ipcc.ch oder im Buchhandel erhältlich.



Computersimulationen erlauben Vorhersagen über die Entwicklung des globalen Klimas. Diese Modelle beschreiben quantitativ die physikalischen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean, Meereis und Landoberflächen. Als Parameter benötigen solche Modelle unter anderem die Konzentrationen der wichtigsten langlebigen Treibhausgase, während die Konzentration kurzlebiger Aerosole – die eng mit Wolken- und Niederschlagsbildung verbunden ist – innerhalb der Simulation berechnet wird.

Mit einem am Hamburger Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelten Modell wurde das Klima von 1860 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts durchgespielt. Für die Zeit von 1860 bis heute wurden die beobachteten Konzentrationen oder Emissionen der einschlägigen Spurengase vorgeschrieben; für die Zukunft wurde angenommen, dass sich die heutigen Trends unvermindert fortsetzen. Diese Simulation lieferte eine globale Erwärmung von etwa 0,7 Grad Celsius seit Ende des 19. Jahrhunderts bis zur Gegenwart, was gut mit den Beobachtungen übereinstimmt. Die globale Erwärmung bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts – die Differenz der Dekadenmittel von 2040 bis 2049 sowie von 1990 bis 1999 – liegt bei etwa 0,9 Grad Celsius. Die Kontinente erwärmen sich um 1,4 Grad Celsius und damit etwa doppelt so stark wie die Ozeane. Bis zum Jahr 2100 beträgt die globale Erwärmung je nach Szenarium bis zu 3 Grad Celsius. Zusammen mit der heute bereits messbaren globalen Erwärmung von rund 0,7 Grad Celsius entspräche dies fast dem Temperaturunterschied von der letzten Eiszeit bis heute. Dies würde eine rasante globale Klimaänderung bedeuten, für die es in der letzten Million Jahre kein Analogon gäbe.

Aber selbst in einem Szenarium, in dem der Ausstoß der Treibhausgase bis zum Ende dieses Jahrhunderts auf einen Bruchteil des heutigen Ausstoßes zurückgefahren wird, steigt die globale Mitteltemperatur der Erde immer noch um ein knappes Grad. Dies liegt einerseits an der Trägheit des Klimasystems – vor allem der Weltmeere –, andererseits aber daran, dass sich in der Atmosphäre bereits große Mengen von Treibhausgasen befinden, deren Pegel nur langsam im Verlauf von vielen Jahrzehnten sinken.

Die globale Erwärmung führt zu vermehrtem atmosphärischem Wasserdampf sowie zu einem verstärkten Wasserdampftransport von den Ozeanen auf die Kontinente – und damit dort zu erhöhten Niederschlägen. Re-

gional fallen diese Änderungen jedoch sehr unterschiedlich aus. Generell mehr Niederschlag verzeichnet man in hohen Breiten und in Teilen der Tropen, während die re-

genärmeren Subtropen weiter austrocknen. Damit verschärfen sich die Diskrepanzen zwischen den feuchten und den trockenen Klimaten auf der Erde. Das gilt auch für Europa, hier allerdings mit jahreszeitlichen Unterschieden: Während der Sommerniederschlag fast überall in Europa abnimmt, wird im Winter ein ausgeprägtes Nord-Süd-Gefälle mit einer Abnahme im niederschlagsarmen Südeuropa sowie einer Zunahme im niederschlagsreichen Mittel- und Nordeuropa vorhergesagt.

Diese Zunahme geht mit einer intensivierten winterlichen Sturmaktivität über dem Nordostatlantik und verstärkten Westwinden einher, die feuchte Luft vom Atlantik heranziehen. Auffällig ist eine Häufung von Starkniederschlägen sowohl im Winter als auch im Sommer und damit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen. Dies gilt zum Teil sogar für den Mittelmeerraum, in dem die mittlere Niederschlagsmenge abnimmt. Ursache ist vermutlich der infolge der Erwärmung höhere Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, der bei extremen Wetterlagen zu höheren Niederschlagsmengen führt. Deshalb ist in der Zukunft häufiger mit extremen Überschwemmungen zu rechnen.

Modelle mit grober Maschenweite

Die Ergebnisse hängen zunächst entscheidend vom gewählten Szenarium ab, also von den Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Weltbevölkerung, der Industrialisierung sowie des Verbrauchs fossiler Brennstoffe. Außerdem bieten Modelle immer nur eine angenäherte Simulation des komplexen realen Klimasystems. Generell wird die Aussagekraft der Modelle umso schwächer, je kleiner das betrachtete Gebiet ist. So können beispielsweise regionale Details innerhalb Deutschlands weniger genau erfasst werden als Unterschiede zwischen Nord- und Südeuropa. Das liegt vor allem an der noch relativ groben „Maschenweite“ der globalen Klimamodelle von einigen hundert Kilometern; sie erlaubt es nicht, Gebirge – wie die Alpen – gut aufzulösen oder auch kleinräumige Prozesse – wie die Wolken- und Niederschlagsbildung – adäquat darzustellen. Hinzu kommt, dass die Modelle derzeit noch unvollständig sind. So bleiben mögliche Änderungen sowohl in der Vegetation als auch in der Masse des Inlandeises unberücksichtigt. ▶

Als Folge des skizzierten Klimawandels könnte sich die Vegetation ändern, und dies wiederum würde auf die Temperatur der Landoberfläche zurückwirken. Solche vegetationsdynamischen Rückkopplungen werden vermutlich in der nächsten Generation der Klimamodelle ebenso berücksichtigt wie die Wechselwirkung mit chemischen Prozessen in der Atmosphäre. Es bleibt aber festzuhalten, dass die Simulationen die großskaligen und langfristigen Veränderungen des Klimas trotz aller beschriebenen Unsicherheiten relativ zuverlässig wiedergeben. Das belegen Simulationen vergangener Klimazustände.

Die Klimaproblematik steht inzwischen auch an oberster Stelle auf der Agenda der Weltpolitik. Am 10. Dezember 1997 haben 159 Vertragsstaaten der Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zu Klimaänderungen einstimmig das so genannte Kyoto-Protokoll angenommen. Wie von der ersten Vertragsstaatenkonferenz im April 1995 im Berliner Mandat gefordert, war damit die erste Ausführungsbestimmung zur Klimakonvention wenigstens formuliert. Sie zwingt die Industrieländer – zurzeit 39 –, ihre Treibhausgas-Emissionen bis zur Peri-

Emissionsrechten von einem anderen Land, das über seine Verpflichtung hinaus gemindert hat. Weiterhin muss geklärt werden, wie viel Kohlendioxid von einem neu aufgeforsteten Waldgebiet gebunden wird und somit von den Emissionen durch Nutzung fossiler Brennstoffe abgezogen werden darf. Den aus Sicht der Klimaforscher notwendigen Klimaschutz liefert das Kyoto-Protokoll in der gegenwärtigen Form keineswegs. Um gravierenden Klimaänderungen in den nächsten 100 Jahren vorzubeugen, müsste der Ausstoß von Treibhausgasen bis 2100 auf einen Bruchteil des heutigen Werts reduziert werden. Die jährlichen Konferenzen der Vertragsstaaten bieten allerdings die Chance für Verbesserungen – das war auch beim Montrealer Protokoll der Fall, der Ausführungsbestimmung zur Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht.

In Zukunft muss aber der Einführung regenerativer Energien mehr Gewicht beigemessen werden, denn nur diese (insbesondere Sonnenenergie) stehen unbegrenzt zur Verfügung. Es ist ein Irrglaube, die notwendigen Emissionsreduzierungen bei den Treibhausgasen wären allein durch Effizienzsteigerungen zu erreichen. Es gilt, die Energiewirtschaft langfristig in Richtung regenerativer Energien umzubauen – und das auch deshalb, weil die fossilen Energieträger begrenzt sind und der Energiebedarf der Menschheit steigen wird.

Da das Klima immer nur auf langfristige Strategien reagiert, kann der Umbau der Wirtschaft allmählich innerhalb der nächsten 100 Jahre erfolgen. Wichtig wäre, bereits heute alle Potenziale zum Energiesparen auszuschöpfen und den Weg zu weniger Treibhausgasemissionen zu beschreiten. Insofern markiert das Kyoto-Protokoll einen ersten und sehr wichtigen Schritt in die richtige Richtung.

Schon heute die Weichen für eine nachhaltige Entwicklung zu stellen ist auch ökonomisch sinnvoll: Es kommt insgesamt billiger, Vorsorge zu treffen als zukünftig immer mehr klimabedingte Schäden zu begleichen. Das hat die Elbeflut deutlich vor Augen geführt. Darüber hinaus sollten wir grundsätzlich nicht mit unserem Planeten experimentieren. Die Vergangenheit zeigt, dass vielerlei Überraschungen drohen. So wurde etwa das Ozonloch über der Antarktis von keinem Wissenschaftler vorhergesagt, obwohl die ozonschädigende Wirkung der Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe bekannt war. Das Klima als ein nichtlineares System kann bei starken Auslenkungen unerwartete Reaktionen zeigen: Es darauf ankommen zu lassen, wäre unklug – und unverantwortlich.

Handeln und Verhandeln

ode 2008/2012 um durchschnittlich 5,2 Prozent (bezogen auf die Emission im Jahr 1990) zu senken, wenn die Parlamente das Protokoll ratifizieren oder die Regierungen dem Protokoll beitreten.

Völkerrechtlich verbindlich wird das Kyoto-Protokoll, wenn mindestens 55 der momentan 175 Vertragsstaaten, auf die mindestens 55 Prozent aller CO₂-Emissionen des Jahres 1990 entfallen, ratifiziert haben. Neben dem Kohlendioxid kann auch die Minderung der Emissionen anderer Treibhausgase durch Umrechnung in CO₂-Äquivalente angerechnet werden.

Die Europäische Union muss die Emissionen im Schnitt um 8 Prozent reduzieren, stärker als die USA mit 7 oder Japan mit 6 Prozent. Allerdings ist fraglich, ob die USA das Protokoll ratifizieren werden. Russland soll nur stabilisieren, und Norwegen darf sogar zulegen. Diese unterschiedlichen Minderungssätze sind Resultat nachweislich unterschiedlicher Bedingungen, aber auch teilweise Folge des Verhandlungsgeschicks einzelner Länder.

Mit dem Kyoto-Protokoll beginnt die Menschheit mit einer Art Erdsystem-Management. Die Verfahrensregeln müssen aber noch eindeutig festgelegt werden. Beispielsweise muss klar sein, wie viel Prozent der CO₂-Reduktion ein Land begleichen darf mit dem Kauf von